

# 多火源地地铁站的火灾模拟及烟气特性分析

袁林林, 杨 茉

上海理工大学, 上海  
Email: 182450024@st.edu.cn

收稿日期: 2021年3月15日; 录用日期: 2021年5月3日; 发布日期: 2021年5月10日

## 摘 要

为探究岛式地铁站火灾环境下的烟气蔓延规律, 本文以某岛式地铁站为研究对象, 用Pyrosim建立地铁火灾模型, 观测多火源场景下地铁火灾的发展过程, 研究其楼梯和出口附近的烟气能见度、烟气温度、烟气高度和温度的变化规律。研究发现: 火源分布位置均匀的情况下, 烟气温度的扩散具有对称性; 地铁火灾燃烧初期, 靠近外部火源的楼梯附近的烟气能见度会在下降的过程出现回升的现象; 在火灾达到充分发展阶段时, 车站中部的一氧化碳浓度回落的幅度更加明显; 110 s后, 烟气高度开始波动, 逐渐趋于稳定, 地铁火灾发展到燃烧增长阶段, 烟气温度的上升开始到威胁人身安全。

## 关键词

多火源, 地铁站, Pyrosim, 烟气特性分析

# Fire Simulation and Smoke Characteristics Analysis of Multi-Fire Source Subway Station

Linlin Yuan, Mo Yang

University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai  
Email: 182450024@st.edu.cn

Received: Mar. 15<sup>th</sup>, 2021; accepted: May 3<sup>rd</sup>, 2021; published: May 10<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

In order to explore the law of smoke spread in the fire environment of an island-style subway station, this article takes an island-style subway station as the research object, uses Pyrosim to build a subway fire model, observes the development process of subway fires in a multi-fire source scenario, and studies its stairs and exits. The nearby flue gas visibility, flue gas temperature, flue gas height and temperature changes. The study found that: when the fire source is evenly distributed, the diffusion of the flue gas temperature is symmetrical. In the early stage of a subway fire, the vi-

sibility of smoke near the stairs close to the external fire source will rise during the downward process. When the fire reached its full development stage, the concentration of carbon monoxide in the middle of the station dropped more significantly. After 110 s, the flue gas height began to fluctuate and gradually stabilized. The subway fire developed to the combustion growth stage, and the rise of the flue gas temperature began to threaten personal safety.

## Keywords

Multiple Fire Sources, Subway Station, Pyrosim, Smoke Characteristics Analysis

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着世界城市化进程的发展, 高度发达的城市中, 人口密度逐渐加大, 城市公共交通的建设要求也随之提高。在众多交通工具中, 地铁具有占地面积小、载客量大、运行稳定、环保节能等优点, 是大多数人出行的最佳选择。然而, 地铁同时也具有人流量大、拥堵情况易发、疏散时间长的特点, 一旦发生火灾, 极易造成重大的伤亡事故[1]。表 1 中整理了世界各国的部分地铁火灾事件[2] [3]。

**Table 1.** Sorting out some subway accidents at home and abroad

**表 1.** 国内外部分地铁事故整理

时间	事件
2003 年 2 月	韩国大邱某地铁站发生人为纵火, 造成 198 人死亡, 146 人受伤。
2003 年 12 月	中国上海某地铁站其相邻的商场起火, 烟气蔓延至地铁站。
2006 年 7 月	美国芝加哥某地铁脱轨起火, 152 人受伤。
2013 年 6 月	俄罗斯莫斯科某地铁站电源线故障, 造成 52 人受伤, 约 4500 人紧急疏散。
2014 年 5 月	韩国军埔站高压绝缘子爆炸, 11 人受伤。
2015 年 1 月	美国华盛顿某地铁发生火灾, 造成 1 人死亡, 2 人受伤。
2016 年 10 月	日本东京某地铁站通风口内不明物质燃烧, 地铁停运。
2018 年 6 月	英国伦敦某地铁站因为电子设备过热爆炸, 地铁站内大量浓烟蔓延。
2019 年 10 月	中国香港多个地铁站发生认为纵火, 地铁瘫痪。

在地铁火灾研究中, Cui [4]等使用“FDS + Evac” (Fire Dynamics Simulation + Evacuation)仿真模型, 研究火灾与疏散人员之间的相互作用对疏散结果的影响; Meng [5]等建立了全尺寸的地铁火灾模型, 探究了通风系统对烟雾蔓延的影响; 陈俊沅[6] [7] [8]等建立了 1:10 的地铁多线换乘车站和平行地铁换乘车站火灾实验模型, 研究危险位置发生火灾时的优化排烟方案、不同排烟模式下的烟气扩散规律; Zhang [9]等人建立数值模型, 结合热释放速率、火源点和疏散人员的因素, 分析了具有高潜在风险的火灾场景; Pan [10]等人在地下车站中开展试验, 研究水雾对烟雾扩散的抑制效果; Giachetti [11]等人建立地铁车站模型, 研究在考虑几何结构及通风排烟能力下的烟气扩散规律。

可以发现, 对于地铁火灾的研究, 国内外学者除了收集火灾事故的信息进行分析和进行地铁火灾实验之外, 还广泛采用了建立数值模型的方法, 说明地铁火灾仿真模拟的方法和其得到数据已被认可。而 Pyrosim 软件作为一款常用的火灾仿真软件, 由于其建立的仿真模型比较贴近实际的火灾, 被广泛应用于

模拟各类建筑的火灾[12][13][14]。本文通过对岛式地铁站进行全尺寸比例仿真模型,用 Pyrosim 软件进行模拟建模,观测多火源火灾场景下地铁火灾的发展过程,研究其楼梯和出口附近的烟气能见度、烟气温度、烟气高度和温度的变化规律。

## 2. 模型的建立

### 2.1. 火灾仿真软件 Pyrosim

Pyrosim 是由美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)研发的一款专门用于火灾动态仿真的软件[15]。它能提供三维图形化处理功能,用户可以自行创建模型或者导入 FDS 模型,可以创建通风口、定义燃烧反应和选择燃烧材料,能添加探测设备和灭火设备。Pyrosim 还提供 Smokeview 的调用,以观测火灾发展过程中地铁站内烟气浓度、烟气高度和温度的变化情况[16]。

### 2.2. FDS 模型

本文以某岛式地铁为研究对象,在 Pyrosim 中根据其基本情况和空间结构建立全尺寸火灾模型。主视图如图 1 所示,俯视图如图 2 所示。站厅层 B0 和站台层 B1 均长 120 m,宽 24 m,高 5 m,总面积约为 5760.0 m<sup>2</sup>,站台层和站厅层之间分布有 4 个楼梯疏散通道,站厅层围墙两侧各有两个出口,站台层两侧共均匀分布着 48 个屏蔽门。



Figure 1. Main view of subway station

图 1. 地铁站主视图

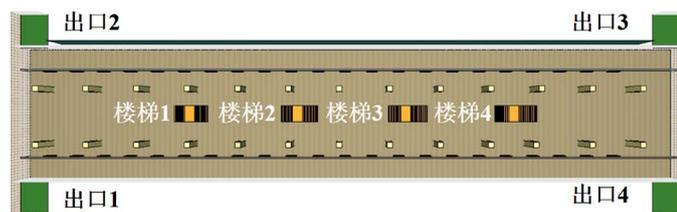


Figure 2. Top view of subway station

图 2. 地铁站俯视图

为观测地铁站内烟气浓度、烟气高度和温度的变化情况,在每个出口和楼梯口处各添加一个烟雾探测器、温度探测器和一氧化碳浓度探测器,在每个楼梯附近各添加一个烟气高度探测器,在地铁站垂面添加一个切片装置以显示燃烧过程的 2D 轮廓。为观测多火源场景下火灾发展的具体过程,研究其烟气含量、温度变化等情况,本文设置 4 个热释放速率为 3000 KW/m、燃烧面积为 2 m<sup>2</sup>的火源,分别位于 24 m、44 m、64 m、84 m 处,如图 3 所示,总体位置偏向车站左端,模拟时间为 600 s。

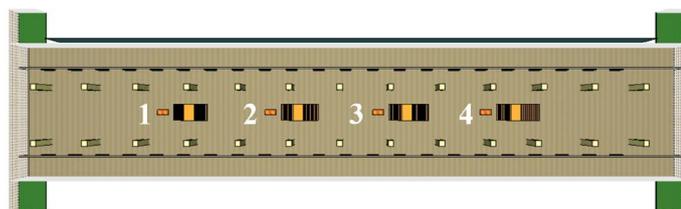


Figure 3. Fire source distribution

图 3. 火源分布图

### 2.3. 基本控制方程

火灾动力学认为, 火灾是一个物理学和化学过程, 其燃烧过程遵循质量守恒、动量守恒、能量守恒等定律, 火灾动力学模拟器 FDS (Fire Dynamics Simulator) 基于以下控制方程求解:

1) 质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{\mu} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{\mu} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2)$$

2) 动量守恒方程:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u \right) + \nabla p = \rho g + f + \nabla \cdot \tau \quad (3)$$

3) 能量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot (\rho h u) = \frac{\partial p}{\partial t} + u \cdot \nabla p - \nabla \cdot q_r + \nabla \cdot (k \nabla T) + \sum_i \nabla \cdot (h_i \rho D_i \nabla Y_i) \quad (4)$$

### 2.4. 燃烧模型

燃烧模型采用氮、氧、水蒸气和二氧化碳的混合物混合受限的无限快反应燃烧模型, 包含了描述气体燃料和氧气湍流燃烧的源项和边界条件, 热辐射通过热的含灰气体的传输, 真实材料的热分解, 喷头和烟雾探测器的激活, 水和液体燃料液滴的传输, 以及描述建筑物内外火灾的各种其他特征。

### 2.5. 烟气模型

采用 Discrete Ordinates 模型计算辐射气体和烟黑的热辐射量, 求解烟黑质量分数  $w_{soot}$ :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_{soot} \omega_{soot}) + \nabla \cdot (\rho_{soot} h_{soot} u_{soot}) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu t}{\sigma_{soot}} \nabla \omega_{soot} \right) + \frac{dM_{soot}}{dt} \quad (5)$$

采用 Moss-Brookes 烟黑模型计算烟黑的生成量, 求解标准化自由基核浓度  $b_{nuc}^*$ :

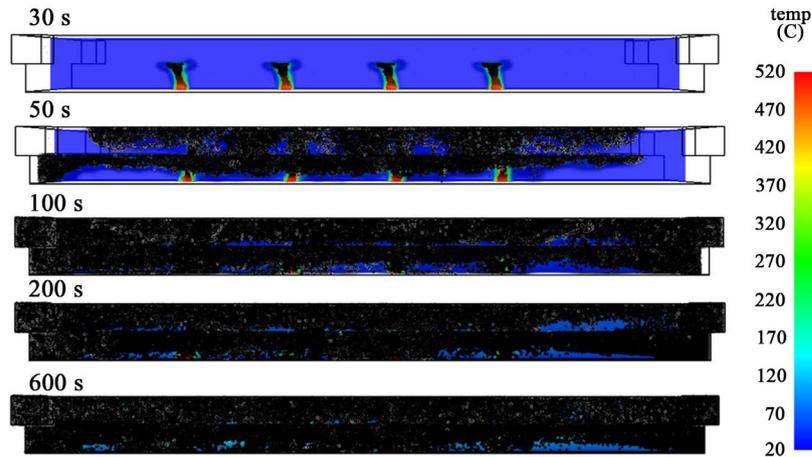
$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_{soot} b_{nuc}^*) + \nabla \cdot (\rho_{soot} v b_{nuc}^*) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu t}{\sigma_{nuc}} \nabla b_{nuc}^* \right) + \frac{1}{N_{norm}} \frac{dN}{dt} \quad (5)$$

## 3. 仿真结果分析

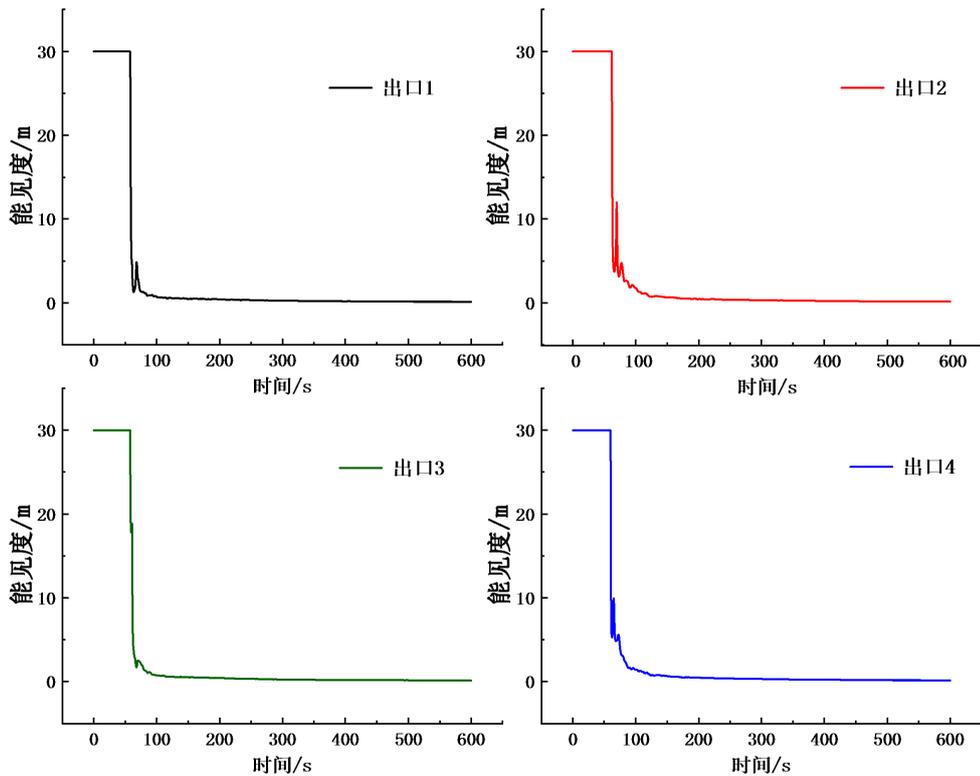
根据上面的模型, 在 Pyrosim 中进行火灾模拟, 得到 30 s、50 s、100 s、200 s、和 600 s 时的结果, 如图 4 所示。由于地铁站的建筑材料以防火材料为主, 因此模型中只考虑火源附近的燃烧反应。可以发现, 30 s 时烟雾已开始从火源处产生, 50 s 时已扩散到站厅层 B0, 100 s 时烟雾已扩散到各个出口附近, 200 s 之后整个地铁站已被烟雾笼罩。此外, 还可以看出火焰与烟雾的发展过程是关于火源中点对称的。

### 3.1. 能见度分析

在 Pyrosim 中添加气相和固相监测设备, 以观测烟气能见度的变化。运行 FDS 模型, 统计出的 4 个出口附近烟气能见度变化情况如图 5 所示, 4 个楼梯附近能见度变化情况如图 6 所示。由图 5 可以看出, 4 个出口的能见度在 50 s 后开始急剧下降, 说明此时烟气已经扩散到各个出口, 出口 1~4 分别在 58.8 s、62.9s、61.2 s、60.6 s 后能见度低于 10 m, 分别在 60.2 s、64.2 s、62.4 s、60.6 s 后能见度低于 5m, 分别在 84.1 s、119.2 s、90.6 s、119.6 s 后能见度稳定地低于 1 m。4 个出口烟气能见度变化趋势基本一致。



**Figure 4.** The process of flame burning and smoke diffusion  
**图 4.** 火焰燃烧和烟气扩散的过程



**Figure 5.** Changes in flue gas visibility near each exit  
**图 5.** 各个出口附近的烟气能见度变化

由图 6 可以看出, 4 处楼梯附近的能见度在 37 s 后开始下降, 说明此时烟气已经开始由站台层 B1 扩散到站厅层 B0, 楼梯 1~4 附近的烟气能见度分别在 39.2 s、40.3 s、44.2 s、50.4 s 后低于 10 m, 分别在 93.0 s、91.8 s、118.0 s、125.0 s 后能见度稳定地低于 1 m, 且楼梯 1 和楼梯 4 均在能见度初次低于 10 m 后有短暂的降低后再回升至 10 m 以上的情况, 说明在火灾发展初期, 楼梯 2 和楼梯 3 附近的火源产生的烟气对楼梯 1 和楼梯 4 附近的烟气浓度有影响, 烟气未充满整个车站时烟气的能见度会出现一个短暂的不稳定状态。

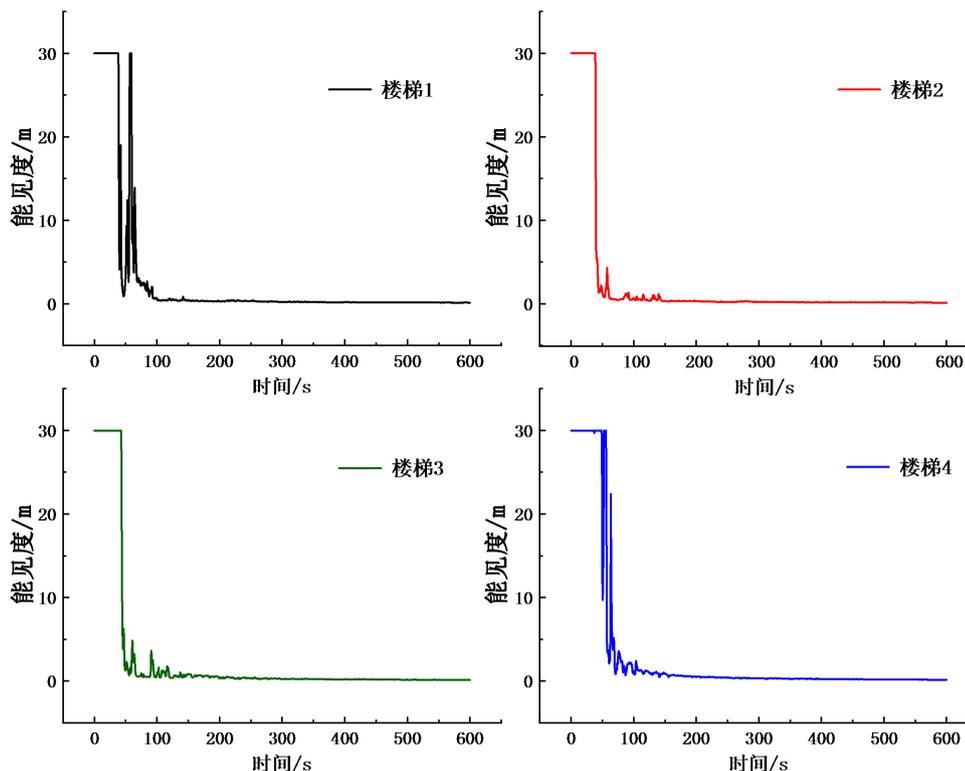


Figure 6. Changes in smoke visibility near each staircase

图 6. 各个楼梯附近的烟气能见度变化

### 3.2. 一氧化碳浓度分析

在 Pyrosim 中添加离子感烟探测器, 以观测烟气中一氧化碳浓度的变化。运行 FDS 模型, 统计出的 4 个出口及车站中部附近的一氧化碳浓度变化情况如图 7 所示。可以看出, 出口 1 与出口 2 一氧化碳浓度变化曲线一致, 出口 3 与出口 4 温度变化曲线一致, 都是从 52 s 以后稳定地增加, 且出口 1、2 的浓度总是高于出口 3、4 的 200 ppm 以上。而车站中部的一氧化碳浓度自 32 s 后增加, 受到的波动比较大, 且出现一氧化碳浓度降低的现象。

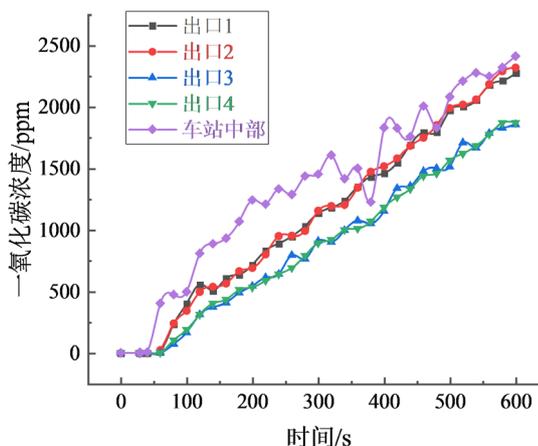


Figure 7. Changes in the concentration of carbon monoxide near the station exit and center

图 7. 车站出口及中部附近的一氧化碳浓度变化

### 3.3. 烟气高度分析

在 Pyrosim 中添加层区探测设备, 以观测烟气高度变化。运行 FDS 模型, 统计出车站左端、车站中部和车站右端烟气高度变化情况如图 8 所示。车站中部的烟气高度自 42 s 后开始下降, 中部自 28 s 后开始下降, 右端自 61 s 后开始下降, 而车站中部的烟气高度降低得比左端和右端剧烈, 且右端的平均高度高于左端和右端, 说明当多火源地铁火灾的场景下, 火源位置稍偏则对相反方向的区域烟气高度影响较大。当火灾发展到 100 s 后, 左右两端烟气高度下降时, 地铁中部的烟气高度呈上升趋势, 反之, 左右两端烟气高度上升时, 地铁中部烟气高度呈下降趋势, 说明地铁火灾发展到中后期, 左右两端的烟气高度与地铁中部的烟气高度呈相反的上升/下降趋势。

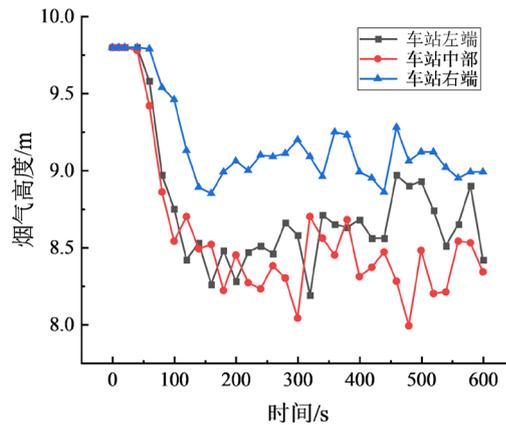


Figure 8. Smoke height change at station  
图 8. 车站烟气高度变化

### 3.4. 烟气温度分析

在 Pyrosim 中添加感温探测器, 利用热辐射效应, 使得探测器接收到辐射能后引起温度升高, 以观测温度变化。运行 FDS 模型, 统计出各个出口烟气温度变化情况如图 9 所示。四个出口均在 37 s 后温度开始升高, 而出口 1 和出口 2 的温度增长幅度高于出口 3 和出口 4, 出口 1 和出口 2 在 110 s 达到 68°C 后开始增速开始放缓, 而出口 3 和出口 4 在 131 s 达到 62°C 后增速开始放缓, 说明 111 s~131 s 时, 火灾发展到了燃烧增长时期, 已能对人员安全产生威胁。

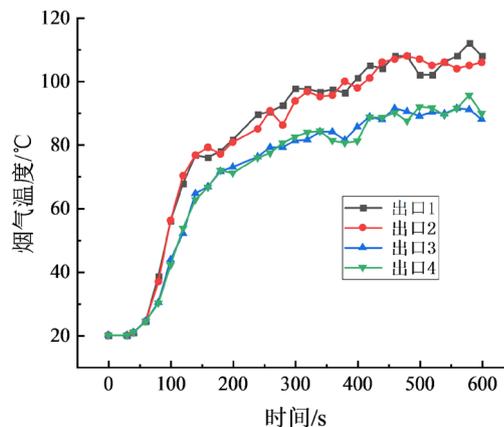


Figure 9. Changes in flue gas temperature near each outlet  
图 9. 各个出口附近的烟气温度变化

## 4. 结论

通过模拟仿真的方法, 设计热释放速率为 3 MW 的多火源地地铁火灾场景并建立火灾模型, 对比分析地铁各个位置的烟气能见度、一氧化碳浓度、烟气高度和烟气温度变化情况, 研究发现:

1) 多火源场景中, 火源分布位置均匀的情况下, 烟气温度的扩散具有对称性, 110 s 后, 烟气开始蔓延至各个出口, 地铁火灾进入燃烧增长阶段。

2) 4 个出口附近的烟气能见度上升趋势一致, 而靠近火源 1 和火源 4 的楼梯附近的烟气能见度会在上升的过程出现回落的现象。一氧化碳浓度方面, 出口附近持续上升, 而车站中部会出现回落, 且在 305 s 后车站中部的一氧化碳浓度回落的幅度更加明显, 说明 305 s 后地铁火灾达到充分发展阶段。

3) 车站中部和车站左端的烟气高度在火灾发展初期下降趋势相似, 在 110 s 后, 三个区域的烟气高度开始波动, 逐渐趋于稳定, 车站右端的烟气高度高于左端和中部, 说明车站右端烟气高度到达威胁人身安全的时间更晚。

4) 四个出口的烟气温度在 110 s 达到 68℃ 后增幅放缓, 出口 1 和出口 2 的温度始终高于出口 3 和出口 4, 说明 110 s 后地铁火灾发展到燃烧增长阶段, 温度的上升开始到威胁人身安全。

## 基金项目

国家自然科学基金项目(51736007)。

## 参考文献

- [1] 李真. 北京某地铁站的火灾和人员疏散模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [2] 杜宝玲. 国外地铁火灾事故案例统计分析[J]. 消防科学与技术, 2007, 26(2): 214-217.
- [3] 于恒. 基于火灾动力学与人群疏散模拟的地铁车站火灾安全疏散问题研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [4] Cui, T.J. and Ma, Y.D. (2013) FDS-Based Fire Simulation and Evacuation Plan for Subway Station in Course of Construction. *Journal of Natural Disasters*, **22**, 178-184.
- [5] Meng, N., Hu, L., Wu, L., Yang, L., Zhu, S., Chen, L. and Tang, W. (2014) Numerical Study on the Optimization of Smoke Ventilation Mode at the Conjunction Area between Tunnel Track and Platform in Emergency of a Train Fire at Subway Station. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **40**, 151-159. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.09.014>
- [6] 陈俊洋, 钟茂华, 程辉航, 等. 地铁多线换乘车站火灾模型实验研究-(2)十字换乘车站火灾[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(5): 5-11.
- [7] 龙增, 钟茂华, 杨宇轩, 等. 地铁多线换乘车站火灾模型实验研究-(3)平行换乘车站火灾[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(10): 12-19.
- [8] 程辉航, 钟茂华, 陈俊洋, 等. 地铁多线换乘车站火灾模型实验研究-(4)换乘通道火灾[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(2): 12-19.
- [9] Zhang, L., Wu, X., Liu, M., et al. (2019) Discovering Worst Fire Scenarios in Subway Stations: A Simulation Approach. *Automation in Construction*, **99**, 183-196. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.12.007>
- [10] Pan, L.W., Lo, S.M., Liao, G.X. and Cong, B.H. (2011) Experimental Study of Smoke Control in Subway Station for Tunnel Area Fire by Water Mist System. *Procedia Engineering*, **11**, 335-342. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.666>
- [11] Giachetti, B., Couton, D. and Plourde, F. (2017) Smoke Spreading Analyses in a Subway Fire Scale Model. *Tunneling and Underground Space Technology*, **70**, 233-239. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.08.008>
- [12] Liang, T., Liu, J. and Tao, P. (2019) The Implementation of the Numerical Simulation by Utilization of Pyrosim on the Rectification of the Hazard of Fires. *Proceedings of the 11th International Conference on Computer Modeling and Simulation*, North Rockhampton, 16-19 January 2019, 31-35. <https://doi.org/10.1145/3307363.3307397>
- [13] Tsukahara, M., Koshiba, Y. and Ohtani, H. (2011) Effectiveness of Downward Evacuation in a Large-Scale Subway Fire Using Fire Dynamics Simulator. *Tunneling and Underground Space Technology*, **26**, 573-581.

<https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.02.002>

- [14] Roh, J.S., Ryou, H.S., Park, W.H., *et al.* (2009) CFD Simulation and Assessment of Life Safety in a Subway Train Fire. *Tunneling and Underground Space Technology*, **24**, 447-453. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2008.12.003>
- [15] McGrattan, K., Klein, B., Hostikka, S. and Floyd, J. (2010) Fire Dynamics Simulator (Version 5), User's Guide. NIST Special Publication 1019-5, 1-186.
- [16] 吕淑然, 杨凯. 火灾与逃生模拟仿真 Pyrosim + Pathfinder[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.